

基于节点刚度的柱面巨型网格结构静力性能研究

李 峰¹, 姜巧娜², 刘 涛³, 左松林¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安山鼎建筑工程设计咨询有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 中国建筑西北设计研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 建立半刚性节点柱面巨型网格结构数值分析模型, 考虑几何非线性和初始缺陷的影响, 分别研究节点轴向半刚性、弯曲半刚性及双半刚性结构的静力性能, 还提出了双半刚性节点研究的不断逼近计算方法. 结果表明: 只考虑节点轴向刚度时, 若其增加, 静力稳定承载力随之增大; 只考虑节点弯曲刚度时, 静力稳定承载力变化较小; 两者同时考虑时, 结构承载力较只考虑轴向刚度时明显降低, 可见节点的轴向刚度和弯曲刚度叠加效应明显. 进而考虑此叠加效应, 研究了焊接球节点结构的静力性能, 发现节点刚度变化会引起结构内力与位移的显著变化, 可见实际工程中节点半刚性的影响不能忽视.

关键词: 柱面巨型网格; 节点刚度; 静力性能; 有限元分析; 焊接球节点

中图分类号: TU356

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2014)05-0682-05

巨型网格结构是一种新型的空间大跨结构, 它层次分明, 传力明确, 自重轻, 形式多样化, 可应用于超大跨度, 在施工上, 可以主-子结构单独制作, 整体吊装, 比传统的空间网格结构更加便利, 另外, 子结构形式多样化, 不仅外表美观, 还可以做成可开合结构, 满足更多的结构功能. 因此, 巨型网格结构具有广阔的应用前景, 受到越来越多学者的关注, 也获得了一些有价值的研究成果, 但是现有的研究成果都是基于铰接节点^[1-4], 与节点的实际力学性能有一定偏差, 尚缺乏半刚性节点工程设计的理论指导. 就空间结构半刚性节点研究领域, 目前的研究大多集中在常规网壳, 尤其在承载力和稳定性方面的研究卓有成效^[5-9], 例如, 哈尔滨工业大学建立了半刚性节点凯威特型单层球面网壳的精确化数值模型, 进行了一系列的静力稳定性研究, 取得了一些有价值的研究成果^[5-6]. 因此可以借鉴已有的研究方法分析半刚性节点巨型网格结构的力学性能, 具有重要的理论价值和现实意义.

本文就节点轴向半刚性、弯曲半刚性和二者相互作用时的圆柱面巨型网格结构静力稳定性、内力分布以及位移响应作以详细分析.

1 半刚性节点模型

应用 Ansys 软件, 参考王星、董石麟杆件模型^[10]设置网壳中的杆件模型, 如图 1 所示 (左图为杆件模型图, 右图为有限元模型图, 左图中的杆件单元为右图中的杆件, 节点域单元为杆件与杆件相连接的节点, 连接单元在有限元模型图中无法显示, R 为节点域半径, 即焊接球的半径, L 为杆件的长度). 节点域和杆件都用 Beam4 单元模拟, 设置节点域截面远远大于杆件截面, 更加真实的反应其弯曲刚度的不同, 在节点域和杆件的重合节点处设置 Combin39 单元, 模拟节点的半刚性. Combin39 单元是一种具有非线性功能的单向弹簧单元, 所以杆件的每端都需要设置四个弹簧单元与节点域相连, 一个轴向拉压弹簧, 一个扭转弹簧, 两个弯曲弹簧, 其刚度值在单元实常数中设置. 建立弹簧单元时需注意激活 X 向与杆件平行的局部坐标系, 以便正确设置弹簧方向, 并旋转弹簧单元的节点坐标系, 使之为此局部坐标系方向, 之后耦合重合节点处的 Y 和 Z 向平动自由度.

将用这种方法建立的半刚性节点引入到文献[7]中提到的 Williams 双杆体系中, 得到的不同刚度下结构的荷载位移曲线与文献中的基本一致, 验证了此半刚性节点模型建立方法的正确性.

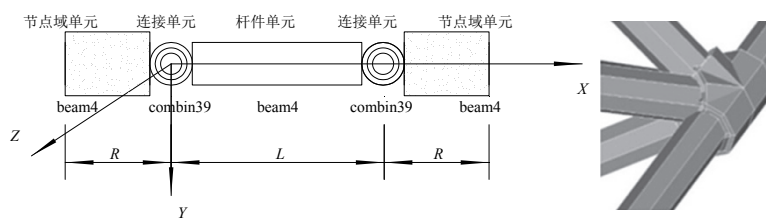


图 1 半刚性节点的杆件模型与有限元模型

Fig.1 Rods model and finite element model of semi-rigid joints

收稿日期: 2014-03-10

修改稿日期: 2014-09-25

基金项目: 陕西省教育厅基金项目 (12JK0910); 西安建筑科技大学科研基金项目 (JC1002); 西安建大钢结构创新团队资助计划

作者简介: 李峰 (1963-), 女, 博士, 副教授, 主要从事钢结构抗震理论与设计研究工作. E-mail: lililan90@163.com

2 静力稳定性研究

结构形式如图 2 所示, 结构跨度 80 m, 矢跨比 0.2, 纵向长 115 m, 主体结构纵横向网格数为 5×4, 每个大网格均为正方形, 立体桁架梁均由 8 个倒置的四角锥组成, 立体桁架梁的高度与宽度比为 1.2, 杆件采用 φ140 mm×4.5 mm 的圆钢管, 节点域半径采用 200 mm, 正放四角锥双层平板网架子上弦网格数为 9×9, 主子结构在上弦重合节点处相连, 如图 3 所示, 具体的建模过程参考文献[1]. 本文只研究主结构单独承载的情况, 将子结构荷载静力等效到主结构上弦主子连接处.

对于圆柱面立体桁架系巨型网格结构, 尽管主体结构立体桁架梁本身是双层的, 但是从整体角度看, 它却是一个单层梁系壳体结构, 仍存在稳定性问题. 对结构引入上述半刚性节点模型, 考虑结构的几何非线性, 一致缺陷法考虑初始缺陷, 进行承载全过程跟踪分析.

4 种所研究结构支承形式为:

支承一: 两纵边上下弦固定铰支;

支承二: 两纵边上弦固定铰支;

支承三: 两纵边下弦固定铰支;

支承四: 两纵边上下弦固定铰支+端部下弦固定铰支.

2.1 节点轴向刚度对结构静力稳定性的影响

将节点处弯曲和扭转自由度耦合, 只考虑轴向刚度 K_N 的影响, 不同 K_N 下的极限荷载 P_u 列于表 1, 其中 μ 为相对于刚接模型极限荷载降低的比值. 由表 1 可知, 当 K_N 小于 10^8 N/m 时, 结构承载能力较小, 其相对于完全刚接时基本降低 70%以上; 当 K_N 大于 10^9 N/m 时, 结构承载力较大, 其相对于完全刚接时基本降低不足 30%. 当 K_N 大于 10^{12} N/m 时, 结构的承载力相对于完全刚接时相差不足 10%, 基本相当于完全刚接.

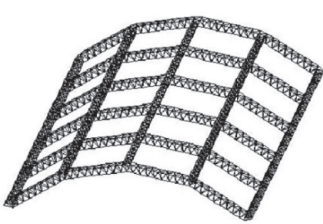


图 2 主体结构

Fig.2 The main structure

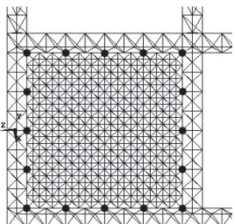


图 3 主子结构连接示意图

Fig.3 The connection of main structure with substructure

表 1 轴向半刚性节点结构极限荷载								
Tab.1 Structural ultimate load of axial semi-rigid connection								
K /N·m ⁻¹	支承一		支承二		支承三		支承四	
	P_u /N·m ⁻²	μ /%	P_u /N·m ⁻²	μ /%	P_u /N·m ⁻²	μ /%	P_u /N·m ⁻²	μ /%
10^7	467.9	95.7	301.8	96.2	390.2	96.1	498.2	96.2
10^8	3 569.7	67.3	2 129.0	73.2	2 770.42	71.9	3 591.3	73.0
10^9	9 002.4	17.4	7 036.5	11.5	7 263.25	26.5	9 124.7	31.3
10^{10}	9 975.7	8.5	7 461.5	6.1	8 199.3	17.1	9 921.0	25.3
10^{11}	10 421.8	4.4	7 709.3	3.0	9 187.1	7.0	1 1030.8	16.9
10^{12}	10 608.4	2.7	7 880.7	0.8	9 270.1	6.2	1 2367.9	6.9
∞	10 904.9	0	7 946.9	0	9 881.4	0	1 3281.6	0

2.2 节点弯曲刚度对结构静力稳定性的影响

将结构杆件端部和节点域端部重合节点的轴向自由度耦合, 只考虑弯曲刚度 K_M 的影响, 进行承载的全过程跟踪分析, 结果发现节点弯曲刚度对结构静力稳定承载力影响很小, 相对于节点完全刚接时差值在 5%范围内, 证明桁架梁内部杆件之间的 K_M 对整体结构的刚度影响不大.

2.3 节点轴向和弯曲刚度同时考虑时结构的静力稳定性

对于焊接球节点, 有实验表明, 其轴向刚度和弯曲刚度均不可忽略^[11]. 对于桁架梁结构, 其内部的杆件间节点的轴向刚度为半刚性时, 可看做桁架梁之间为半刚接节点连接, 此时, 内部杆件间节点的弯曲半刚性将会加大桁架梁间的转动能力, 因此有必要研究节点轴向刚度和弯曲刚度的叠加效应.

引入文献[11]中的节点刚度双线性模型, 如图 4 所示. 若曲线代表轴力-位移曲线, 则 K 为 K_N , F_u 为 N_u , Δ_u 为 Δ_u , a 为 a_N , b 为 b_N ; 若曲线代表弯矩-转角曲线, 则 K 为 K_M , F_u 为 M_u , Δ_u 为 θ_u , a 为 a_M , b 为 b_M . 其中, K_N 为节点轴向刚度 (109 N/m), K_M 为节点弯曲刚度 (106 N·m/rad); N_u 为焊接空心球节点轴力极限荷载 (N); M_u 为焊接空心球节点弯矩极限荷载 (kN·m); a_N 为轴向屈服系数, 取 0.93; a_M 为弯曲屈服系数, 取 0.90; b_N 为轴向刚度系数; b_M 为弯曲刚度系数, 其计算公式如下:

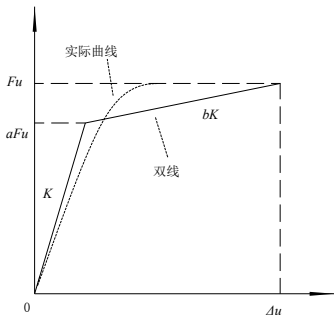


图 4 节点双线性模型

Fig.4 The bilinear model of joints

$$K_N = -18.76 + 147.75 \frac{d}{D} - 406.80 \left(\frac{d}{D} \right)^2 + 366.67 \left(\frac{d}{D} \right)^3 + 0.62 \frac{d}{D} t + 0.044 t$$

(1)

$$K_M = 324.17 - 2512.70 \frac{d}{D} + 6288.80 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 5238.67 \left(\frac{d}{D} \right)^3 + 9.88 \frac{d}{D} t - 2.15 t$$

(2)

$$N_u = \left[0.92 \left(\frac{e}{d} \right)^2 - 1.4 \frac{e}{d} + 1 \right] \left(0.386 + 0.729 \frac{d}{D} \right) \pi t d f$$

(3)

$$M_u = \left[3.176 \left(\frac{e}{d} \right)^3 - 4.176 \left(\frac{e}{d} \right)^2 + 2.778 \frac{2e}{d} \right] \left(0.509 + 0.690 \frac{d}{D} \right) t d^2 f$$

(4)

$$b_N = \left(0.454 c^3 - 1.914 c^2 + 1.586 c + 1 \right) \left(\frac{28 D^2}{10^5 t d} - 0.01 \right)$$

(5)

$$b_M = 0.0045 \left(0.798 c^3 - 3.697 c^2 + 4.371 c \right)$$

(6)

$$c = \frac{2e}{d}$$

(7)

上式中： d 为焊接球连接圆管直径，mm； D 为焊接球直径，mm； t 为焊接球壁厚，mm； e 为焊接球连接圆管端部的偏心距，mm； f 为钢材的抗拉强度标准值，N/mm²。

结构杆件取用 140 mm×4.5 mm 的圆钢管，根据文献[12]选用表 2 中的焊接空心球尺寸。

焊接球节点刚度还受偏心距的影响，也就是说，根据具体的受力情况节点表现出具体的刚度特性。因此采用图 5 所示不断逼近的方法找出合理的节点刚度，进行静力计算。

表 2 焊接空心球尺寸及初始刚度

Tab.2 The size and stiffness of welded hollow spherical joint						
模型	焊接 1	焊接 2	焊接 3	焊接 4	焊接 5	焊接 6
D/mm	350	400	400	400	450	450
t/mm	10	12	14	16	14	16
$K_N/(109 \text{ N/m})$	1.639	1.972	2.494	3.016	2.190	2.664
$K_M/(106 \text{ N} \cdot \text{m/rad})$	8.043	6.191	8.807	11.423	6.318	8.166

表 3 焊接球节点结构静力稳定承载力

Tab.3 The static stability capacity of structure in welded hollow spherical joint						
模型	焊接 1	焊接 2	焊接 3	焊接 4	焊接 5	焊接 6
情况一/(N/m ²)	9 187.3	9 250.3	9 256.9	9 306.2	9 229.9	9 272.8
情况二/(N/m ²)	8 454.9	8 398.7	8 566.15	8 774.1	8 388.1	8 541.2
$\delta_1/\%$	7.97	9.21	7.46	5.72	9.12	7.89
$\delta_2/\%$	15.71	15.13	15.07	14.62	15.32	14.93
$\delta_3/\%$	22.43	22.95	21.41	19.5	23.05	21.64

采用支承形式一，由表 1 可知刚接模型的稳定承载力为 10.9 kN/m²，半刚性节点结构极限荷载如表 3 所示，其中，情况一为只考虑了节点轴向刚度的情况，情况二为节点轴向刚度和弯曲刚度同时考虑的情况， δ_1 为情况二相对于情况一承载力降低的幅度， δ_2 为情况一相对于刚接模型降低的幅度， δ_3 为情况二相对于刚接模型降低的幅度。可见轴向刚度和弯曲刚度同时考虑时，承载力将会较只考虑轴向刚度时有所降低，2 号焊接球表现最为明显，承载力从 9.25 kN/m²降低到 8.40 kN/m²，降低了 9.21%，可见，节点轴向刚度和弯曲刚度的叠加效应明显。当考虑此叠加效应时，结构承载力较刚接模型降低较大，约降低 20%左右。按情况二承载力从大到小，把焊接球半刚性节点模型进行排序，为焊接 4>焊接 3>焊接 6>焊接 1>焊接 2>焊接 5，此排序即为半刚性结构整体刚度从大到小的排序，也就是焊接球半刚性节点刚度从大到小的排序。

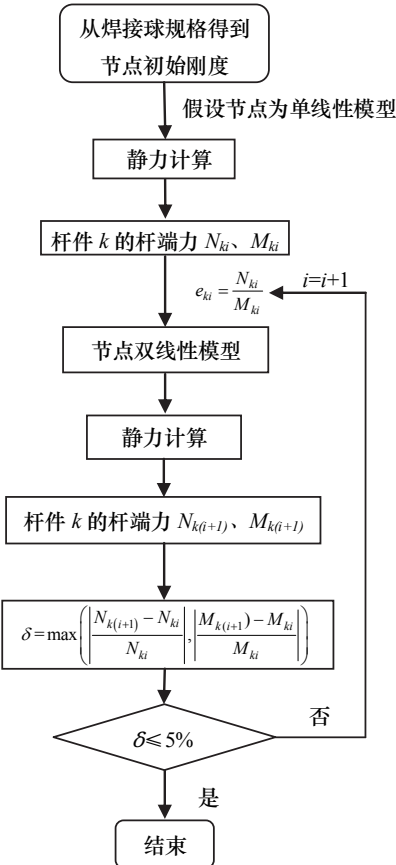


图 5 焊接球结构静力计算流程图
Fig.5 The static calculation flowchart of structure in welded hollow spherical joint

3 节点刚度对结构静力性能的影响

仍以上述结构为研究对象, 荷载为 1 kN/m^2 , 选用支承一, 将子结构的荷载静力等效到主结构上弦主子结构连接处, 只考虑主体结构单独承载, 考虑结构的几何非线性, 一致缺陷模态法考虑结构的初始缺陷, 进行静力计算。

3.1 节点刚度对结构内力的影响

由文献[1]可知, 主体结构拱向桁架中的弦杆是主要受力杆件, 因此取中间立体桁架拱的上下弦杆进行研究, 如图 6 所示进行编号, 节点仍取用表 2 中的焊接球规格, 考虑节点轴向刚度和弯曲刚度的叠加效应, 采用图 5 所示的计算方法, 进行静力计算, 各杆件轴力如图 7 所示。

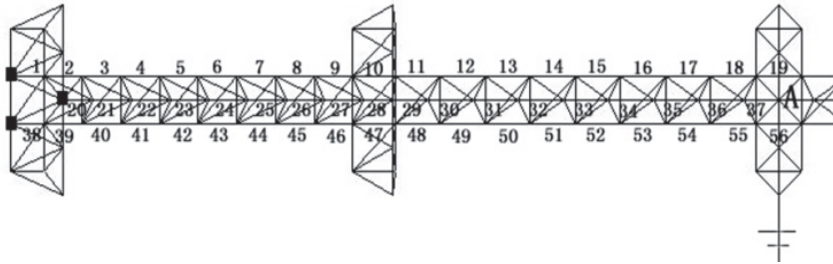


图 6 中间立体桁架拱

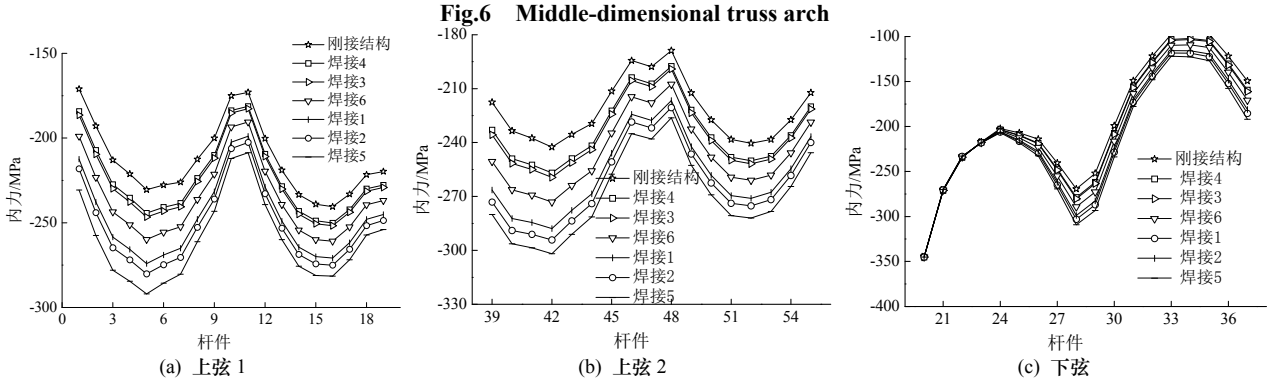


图 7 中间桁架拱弦杆应力分布

Fig.7 Chord stress distribution of the middle truss arch

由图 7 可知, 随着节点刚度的减小, 上下弦杆内力均增大。整体看来, 边缘桁架梁比中间桁架梁上弦杆内力幅值变化明显, 每根桁架梁中部上弦杆比端部变化明显; 边缘桁架梁下弦由外而内变化明显; 中间桁架梁下弦杆两端比中部变化明显。

3.2 节点刚度对结构位移的影响

考虑焊接球节点刚度的影响, 不同焊接球规格下的结构最大位移列于表 4, 其中 δ 表示焊接球结构相对于刚接模型最大位移变化的百分比。可见, 随着节点刚度减小, 位移逐渐增大, 焊接 5 表现最为明显, 位移增大了 17.56%, 可见节点半刚性的影响不可忽略。

表 4 不同轴向刚度下结构最大位移

Tab.4 The maximum displacement of the structure with different node axial stiffness								
模型		刚接	焊接 4	焊接 3	焊接 6	焊接 1	焊接 2	焊接 5
最大位移	幅值/mm	131	136	139	142	148	150	154
	$\delta/\%$	—	3.82	6.11	8.40	12.98	14.50	17.56

4 结论

本文研究了节点刚度对结构静力性能的影响, 有以下结论。

(1) 节点刚度对结构静力稳定承载力的影响:

只考虑节点轴向刚度时, 当轴向刚度小于 108 N/m 时, 承载能力相对于完全刚接时基本降低 70% 以上; 当轴向刚度大于 109 N/m 时, 承载力相对于完全刚接时基本降低不足 30%; 当节点轴向刚度大于 1012 N/m 时, 承载力相对于完全刚接时相差不足 10%, 可按完全刚接计算。

只考虑节点弯曲刚度时, 节点弯曲刚度对结构静力稳定承载力影响较小。

节点轴向刚度和弯曲刚度同时考虑时, 由于节点的轴向半刚性, 节点的弯曲半刚性将会加大桁架梁间

的转动能力, 结构承载力将会较只考虑轴向刚度时有所降低, 焊接 2 表现最为明显, 承载力从 9.25 kN/m^2 降低到 8.40 kN/m^2 , 降低了 9.21%, 可见, 节点轴向刚度和弯曲刚度的叠加效应明显. 当考虑此叠加效应时, 结构承载力较刚接模型降低较大, 约降低 15% 左右.

(2) 节点刚度对结构静力性能的影响:

考虑焊接球节点轴向刚度和弯曲刚度的叠加效应, 随着节点刚度的减小, 上下弦杆内力均增大. 边缘桁架梁比中间桁架梁上弦杆内力幅值变化明显, 每根桁架梁中部上弦杆比端部变化明显; 边缘桁架梁下弦杆由外而内变化明显; 中间桁架梁下弦杆两端比中部变化明显. 其中 5 号焊接球结构的变化最大, 相对于完全刚接结构, 上弦杆 3 内力幅值增大 64.97 MPa , 提升 30.5%; 下弦杆 37 内力幅值增大 42.53 MPa , 提升 28.5%. 由此可见节点刚度变化会引起结构的内力的显著变化, 设计时不能忽略.

随着节点刚度减小, 结构最大位移逐渐增大. 5 号焊接球结构表现最为明显, 位移相对于刚接模型增大了 17.56%, 可见节点半刚性的影响不可忽略.

参考文献 References

- [1] 贺拥军. 巨型网络结构的形体、静力及稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
HE Yongjun. The form, static and stability research of reticulated mega-structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [2] 丁乐然. 肋环型巨型网络弦支穹顶结构静力性能及动力特性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
DING Leran. Research on the static behavior and dynamic characteristic of ribbed type mega-latticed suspen-dome structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.
- [3] HE Yongjun, ZHOU Xuhong, DONG Shilin. Research on dynamic property of cylindrical latticed intersected 3D beam system reticulated mega-structure with single layer latticed shell substructure[C]//Proceedings of the English International Symposium on Structural Engineering for Young Experts. Beijing: Science Press, 2004: 785-791.
- [4] 贺拥军, 周绪红, 董石麟. 交叉立体桁架系巨型网络结构的超级元与子结构相结合计算方法[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 5-10.
HE Yongjun, ZHOU Xuhong, DONG Shilin. The method of combining super finite elements and substructures for analysis of lattice-intersected three-dimensional reticulated mega-structures[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(3): 5-10.
- [5] 马会环. 半刚性节点单层球面网壳稳定性及其节点性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
MA Huihuan. Stability analysis of semi-rigidity single layer spherical reticulated shells and its joint system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [6] 崔美艳. 半刚性节点单层球面网壳稳定性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
CUI Meiyan. Stability analysis of single layer spherical reticulated shells with semi-rigidity of joint system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [7] 苏玉红. 节点刚度对网壳结构稳定影响的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
SU Yuhong. Research on the effect of joints stiffness on the stability of reticulated shells[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [8] Loureiro E P S A. One step method for buckling analysis of single layer lattice structure with semi-rigid connections[D]. Spain: University of La Coruna, 2002.
- [9] CHENAGHLOU M R. Semi-rigidity of connections in space structures[D]. Guildford, UK: University of Surrey, 1997.
- [10] 王 星, 董石麟. 考虑节点刚度的网壳杆件切线刚度矩阵[J]. 工程力学学报, 1999, 16(4): 24-32.
WANG Xing, DONG Shilin. Tangent stiffness matrix of members of latticed considering joint's stiffness[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(4): 24-32.
- [11] 廖 俊. 考虑节点弹塑性的焊接空心球网壳动力分析方法[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
LIAO Jun. The method for dynamic analysis on reticulated shell considering the elastoplasticity of welded hollow spherical joints[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [12] JGJ7-2010 空间网络结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
JGJ7-2010 technical specification for space frame structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

Static performance research on cylindrical reticulated mega-structure based on joints stiffness

LI Feng¹, LOU Qiaona², LIU Tao³, ZUO Songlin¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Xi'an Cendes Architecture Engineering Design Consulting Co. LTD, Xi'an 710065, China;
3. China Northwest Architecture Design and research institutedeo.LTD, Xi'an 710065, China)

Abstract: Numerical model of cylindrical reticulated mega-structure with semi-rigid joints was established. Considering the geometric nonlinearity and initial defects, the structural static performance was respectively studied with axial semi-rigid joints, bending semi-rigid joints and double semi-rigid joints. The results show that when considering only the axial stiffness of the nodes, if it increases, the static stability capacity increases; when considering only the bending stiffness, the static stability bearing capacity changes little; and considering both, the structural bearing capacity will be significantly reduced compared to only considering the axial stiffness. So, additive effect of joint axial stiffness and bending stiffness is obvious. Considering this additive effect, the static properties of welded ball node structure was studied. The results show that the change of joint stiffness will cause significant changes in the internal forces and displacements of the structure. So, in the actual project, node semi-rigid impact cannot be ignored.

Key words: cylindrical reticulated mega-structure; static performance; joint stiffness; finite element analysis; welded hollow spherical joint

(本文编辑 桂智刚)